黄土高原典型县域碳排放特征与时空格局
——以庆城县为例

龙 志[1,2,3]， 孙颖琦[1,4]， 郎丽霞[1,2,3]， 陈兴鹏[1,2,3]， 张子龙[1,4]， 庞家幸[1,5,6]

（1. 兰州大学资源环境学院，甘肃 兰州 730000；2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室，甘肃 兰州 730000；
3. 兰州大学中国西部循环经济研究中心，甘肃 兰州 730000；4. 兰州大学黄河流域绿色发展研究院，
甘肃 兰州 730000；5. 兰州大学县域经济发展研究院，甘肃 兰州 730000；
6. 兰州大学生态文明建设研究与评估中心，甘肃 兰州 730000）

摘 要：县域是中国碳排放的重要组成部分和碳汇功能的主要承载空间，更是双碳目标和政策落实的关键行政单元。以庆城县为例，探讨黄土高原典型县域的碳排放特征和时空格局，为推动黄河流域生态保护，实现高质量发展和绿色低碳转型提供启示和参考。结果表明：(1) 欠发达地区县域碳排放变化和结构具有鲜明的特征。规模以下工业是庆城县最大的碳排放来源，工业碳排放比重低，第三产业和生活碳排放比重相对较高。(2) 庆城县碳排放空间分布符合帕累托法则，即80%的碳排放集中在20%的区域，总体表现为“整体分散，局部集聚”的空间分布特征。高碳区主要集中在川区、残塬区和县城区；中碳区主要分布在残塬区和交通沿线；低碳区则广泛分布于梁峁沟壑区。(3) 受地形地貌影响，黄土高原县域碳排放呈现出明显的时空格局差异。县城、工业集中区、主要乡镇等中、高碳区最大斑块指数增加，整体性提高，碳源多样性减少，类型趋于单一化。交通沿线和城乡居民聚居区等中碳区与低碳区交错地带碳源多样性增加，聚集度降低。

关键词：黄土高原；碳排放；时空格局；庆城县

气候变化，特别是全球变暖，是建立人类命运共同体和人与自然生命共同体[1-4]所面临的重大挑战。全球变暖与累积的人为温室气体（如CO_2、CH_4等）排放具有显著的相关性[5-6]。作为全球最大的能源消费国、最大的二氧化碳排放国[7-8]和负责任的发展中大国，中国应对气候变化既是推动本国可持续发展的内在需要，也是构建人类命运共同体的责任担当。2021年9月中共中央、国务院提出《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》，为实现“双碳”目标提供了政策指导。毋庸置疑，应对气候变化和实现“双碳”目标的关键在于政策落实与执行。县域是中国经济功能完整、运行相对独立的基本空间单元，也是中国碳排放的重要组成部分和碳汇功能的主要承载空间，更是碳达峰碳中和目标和政策落实的关键行政单元。县域占国土面积的78.00%，人口的71.94%，国内生产总值的51.80%[9]。在县域层面开展碳排放核算工作，厘清县域尺度碳排放的变化趋势、结构特征和时空格局对于制定和实施县域碳达峰、碳排放政策、县域低碳空间规划具有重要意义。

自1979年第一次世界气候大会以来，气候变化和温室气体排放，尤其是碳排放，越来越受到世界各国学者的关注。这不仅是一个科学问题，也是一个全球政治、经济、能源和环境问题。学者们从不同的尺度、部门和范围对碳排放核算[10]、碳足迹[11]、碳交易[12]、碳排放权[13]、碳金融[14]、影响因素[15]以及碳排放与经济增长、产业结构、城市化等[16-18]的关系进行了大量研究。研究尺度涉及全球、国家、省级、市级、县域、社区、农村和企业，包括总体研究和案例研究[19-25]；研究部门涉及制造业、电力、建筑业、农业、林业、商业、旅游、交通等多个领域[26-32]；研究范围包括能源活动、工业过程和产品使用、土地使用

收稿日期：2022-02-24； **修订日期：**2022-05-15
基金项目：国家重点研发计划项目（2018YFC0704702）
作者简介：龙志（1991-），男，博士，研究方向为低碳与区域可持续发展. E-mail: longzh18@lzu.edu.cn
通讯作者：陈兴鹏. E-mail: chenxp@lzu.edu.cn

和废弃物处理产生的碳排放，涵盖生产端和消费端。以往的研究主要集中在估算国家和省级层面的碳排放[10, 33-37]，也有很多研究集中于城市尺度的碳排放研究[22, 38-41]。部分研究通过技术手段对碳排放进行总量分解，得到全国县级碳排放量的估计值[21]，在此数据基础上产生了一系列关于县域碳排放的研究成果[42-45]。有些研究则自上而下利用人口或GDP进行分解[46-48]，分解估算的数据忽略了县域之间经济和产业的异质性，是造成数据偏离现实的主要原因。

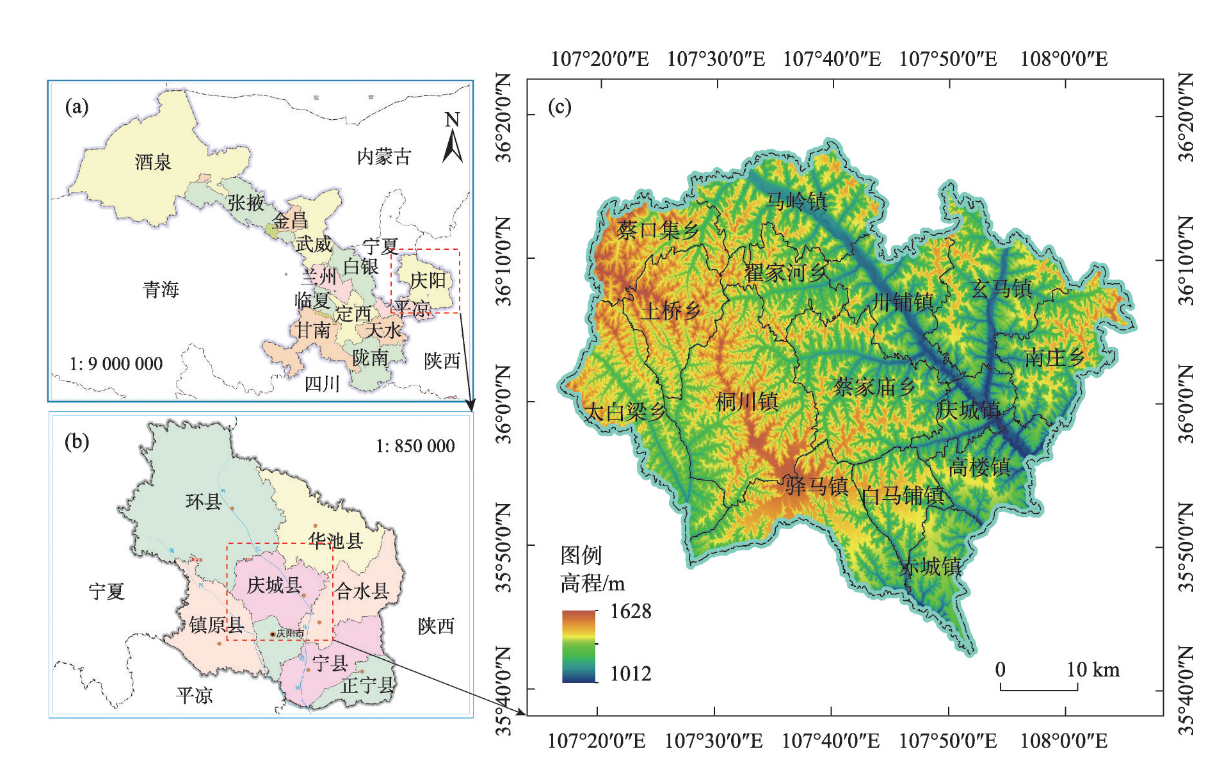
研究大多关注中宏观尺度，多以县级或以上行政区划为基本单元，鲜有通过清单核算对县级碳排放量进行研究，特别是对县域碳排放长时间序列和空间化进行研究。本文聚焦县域尺度，在碳排放清单核算的基础上实现了碳排放的空间表达，探索了黄土高原典型县域碳排放的变化趋势、结构特征以及在县域尺度的时空格局和空间分布规律，对现有的研究进行了有效补充和拓展，为开展进一步的空间分析研究和"双碳"目标下的国土空间规划奠定了基础。以庆城县为例，探讨黄土高原典型县域的碳排放变化、结构特征和时空格局对探索黄土高原欠发达地区"双碳目标"实现路径，推动黄河流域生态保护，实现高质量发展和绿色低碳转型具有启示意义和参考价值。

1 数据来源与方法

1.1 研究区域及数据来源

庆城县位于甘肃省东部(图1)，地处陕、甘、宁交会地带，在地形地貌、社会发展、产业发展等方面具有典型性和代表性。庆城县塬面支离破碎，川、台狭小，山区梁峁起伏、沟壑纵横，是黄土高原典型地貌特征。庆城县属于贫困县，2013年底贫困发生率达22.16%，2020年退出贫困县序列，农业人口占比仍高达76.75%，城镇化水平低，社会发展滞后，是典型的欠发达县域。庆城县为原油主产区，境内探明石油储量4.3×10^8 t，2017年原油和天然气产量分别为129.18×10^4 t和455×10^4 m^3，是典型的资源型县域。工业以石油和天然气开采辅助配套产业为主，工业企业主要分布在马岭镇和卅铺镇境内的西川工业集中区以及驿马镇境内的驿马工业集中区。

本研究数据主要来自县自然资源局、工信局、



注：底图采用甘肃省自然资源厅标准地图制作，审图号为甘S(2017)70号(a)、甘S(2011)22号(b)和甘庆S(2019)4号(c)，对底图边界无修改。下同。

图1 庆城县地理位置示意图

Fig. 1 Location of the study area

住建局、农业农村局、统计局等部门的调研数据以及2008—2017年的《庆城县统计年鉴》。部分背景数据来自CEADs中国碳核算数据库。

1.2 碳排放核算

1.2.1 能源相关碳排放　根据IPCC国家温室气体清单指南，化石能源碳排放的核算是基于每种能源类型燃烧时的发热量、单位热值的含碳量和碳氧化率3个核心指标来进行测算的，能源碳排放量计算公式如下：

$$E_e = AC \times CF \times CC \times COF \tag{1}$$

式中：E_e表示能源使用碳排放量；AC表示表观消费量；CF表示低位发热量；CC表示碳含量；COF表示碳氧化率。IPCC关于燃料中的碳在燃烧过程被氧化的比率默认为完全氧化，这与实际情况存在偏差，核算结果将偏高，国家发改委办公厅先后三批印发的24个行业企业温室气体排放核算方法与报告指南（试行）对此进行了调整，相关参数参考国家发展改革委办公厅发布的指南①。

1.2.2 畜牧业碳排放　畜牧业碳排放主要是以甲烷的形式存在，牛、羊、马、猪、驴和骡等的肠道发酵和粪便管理会产生甲烷。

$$C_{live} = \frac{12}{16}\sum_{i=1}^{n} AAP_i \times \delta_i \tag{2}$$

式中：C_{live}为禽畜养殖年碳排放总量；AAP_i为i种畜禽年平均饲养量；δ_i为i种畜禽CH_4排放系数；12/16为CH_4的碳含量。出栏量大于1的畜禽品种主要有生猪、兔和家禽，其平均生命周期分别为：200 d、105 d和55 d[49-50]。

当出栏率≥1时，畜禽的平均饲养量根据出栏量进行调整，即：

$$AAP_i = \mathrm{Days_alive}_i \times (NAPA_i/365) \tag{3}$$

式中：$\mathrm{Days_alive}_i$为i种畜禽平均生命周期；$NAPA_i$为i种畜禽年生产量（出栏量）。当出栏率<1时，畜禽的年平均饲养量根据年末存栏量进行调整，即：

$$AAP_i = (C_{it} + C_{i(t-1)})/2 \tag{4}$$

式中：C_{it}、$C_{i(t-1)}$分别表示i种畜禽第t年年末存栏量和第t−1年年末存栏量。牲畜养殖过程的碳排放因子详见报告《IPCC 2006年国家温室气体清单指南2019修订版》第4卷第10章②。

1.3 景观格局指数

最大斑块指数（Largest Patch Index, LPI）[51]是对景观优势度的度量，体现整体性[52]，反映景观中多大比例的景观面积是由该斑块的最大斑块组成的，其值的大小决定着景观中优势斑块的丰度等特征。本文中碳源最大斑块指数衡量某一类型碳源的优势度。

景观多样性指数（Shannon's Diversity Index, SHDI）反映的是景观要素的多少及各景观要素所占比例的变化情况，是衡量不同景观或同一景观不同时期多样性变化的常用指数[53-54]。本文中多样性指数越大，说明碳源的空间分布的异质化程度越高。

聚集度指数（Aggregation Index，AI）[55]是基于同类型斑块像元之间的公共边界长度来计算，当某类型中所有像元间不存在公共边界时，该类型的聚集程度最低，反之则聚集程度最高。聚集度指数反应了景观中斑块的团聚程度[56]。本文中碳源的聚集度指数是指碳源中某一类型碳源斑块之间的聚集与分散状态，其值越大，碳源中同类斑块分布越集中。

2 结果与分析

2.1 碳排放变化和结构特征

从总量及其变化上来看，庆城县2008—2017年碳排放量呈现出“波动下降”的阶段性变化特征（图2a）。庆城县碳排放量从2008年的143.87×10⁴ t下降到2017年的117.73×10⁴ t。庆城县碳排放量占甘肃省的比重也由2008年的5.10%降至2017年的2.87%③。庆城县碳排放量在2008—2013年保持持续下降趋势，受县域经济回升影响，2013—2015年碳排放量有所增长。

从强度上来看，庆城县碳排放强度变化呈现出明显的阶段性特征。以2014年为界，庆城县碳排放强度分为2个截然不同的阶段：2008—2014年，庆城县单位GDP碳排放呈现出波动下降的特征，由2008年的2.09 t·(10⁴元)⁻¹降至2014年的1.26 t·(10⁴元)⁻¹，其中2011年有所回增；2014—2017年则持续上升，到2017年，庆城县单位GDP碳排放回增至1.90 t·

① http://zfxxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=1776；https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201502/t20150209_963759.html；http://zfxxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=2313

② https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch10_Livestock.pdf

③ 甘肃省碳排放数据来自CEADs中国碳核算数据库. https://www.ceads.net.cn/data/province/

$(10^4元)^{-1}$(图2b)。

从结构上来看,第二产业碳排放是庆城县最大的排放来源,且呈现出逐年下降的特征。第二产业碳排放量从2008年的78.47×10^4 t下降至2017年的55.67×10^4 t,降幅达29.06%;占庆城县碳排放总量的比重由2008年的54.54%降至2017年的47.28%(图3a)。第二产业碳排放以规模以下工业碳排放为主,2017年排放量为47.12×10^4 t,占庆城县碳排放总量的40.03%;规模以上工业碳排放仅占庆城县碳排放总量的1.2%(图3c)。生活用能是庆城县第二大碳排放来源,其中,农村居民生活用能产生的碳排放量要高于城镇居民生活用能碳排放;庆城县交通运输碳排放变化幅度不大,基本稳定在11×10^4 t左右;庆城县畜牧业碳排放量较少,占比不到1%。

分季度来看,庆城县2017年碳排放主要集中在第3和第4季度,排放量分别为40.68×10^4 t和41.32×10^4 t,占比分别为34.65%和35.19%,主要受工业生产集中在第3季度和第4季度的影响。第1季度和第2季度碳排放量相对较低,分别为10.51×10^4 t和24.91×10^4 t,占比分别为8.95%和21.21%(图3b)。

2.2 碳排放分布特征

在县域尺度碳排放核算的基础上,根据多源碳排放数据、空间网格数据、路网和土地利用数据,利用ArcGIS软件平台的相交、空间连接等叠加分析工具,得到200 m×200 m碳排放的空间化结果(图4a)。

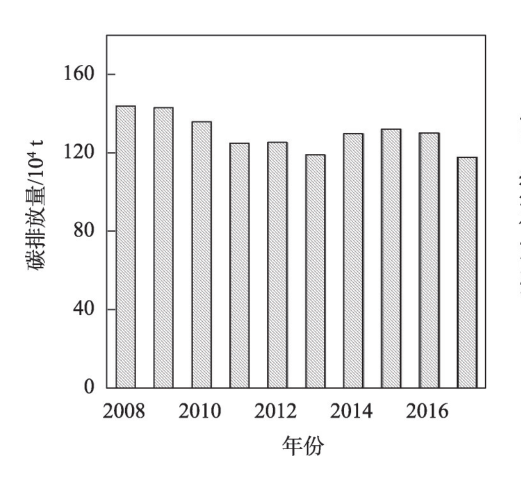
从县域尺度来看,庆城县碳排放分布存在显著的时空差异,总体呈现为"整体分散,局部集聚"的空间分布特征(图4a)。高碳区主要分布在川区、残塬区和县城区;中碳区主要集中在残塬区和交通沿线;低碳区则广泛分布于梁峁沟壑区。2008—2017年,庆城县高碳排放区集聚程度不断提高,在空间上呈现出向县城区、主要乡镇和工业园区以及主要交通线路集中的变化趋势。

从乡镇尺度来看,马岭镇、驿马镇、庆城镇和卅铺镇是碳排放量最多的4个乡镇(图4b)。西川工业集中区主要分布在马岭镇和卅铺镇,驿马镇境内有驿马工业集中区。西川和驿马工业集中区是庆城县主要的工业承载地。庆城镇是县城所在地,人口相对较多,第三产业较为发达,碳排放量也较多,仅次于马岭镇和驿马镇;其他乡镇碳排放量较少。根据碳排放空间分布洛伦茨曲线(图4c)发现,庆城县碳排放空间分布符合帕累托法则,约80%的碳排放集中在20%的区域。

2.3 碳排放时空格局

从整体性来看,庆城县碳源LPI高值区分布于中西部和北部梁峁地区,低值区主要分布在川区以及南部的塬区(图5a)。研究期内庆城县大部分区域碳源LPI变化不明显;县城、主要乡镇和人口聚居区碳源LPI增加,整体性提高;低碳源区LPI减少,其中以城镇、主要农村居民点和路网周边的变化最为明显(图5d)。

从多样性来看,庆城县碳源SHDI高值区主要分布在环江和柔远河川区、南部的塬区以及主要交通沿线,低值区主要分布在中西部和北部梁峁地区(图5b)。研究期内庆城县工业集中区、乡镇和主要居民点等中、高碳区多样性减少,碳源类型趋于单一化,交通沿线和城乡居民聚居区等中碳区域与低碳区域交错地带多样性增加(图5d)。



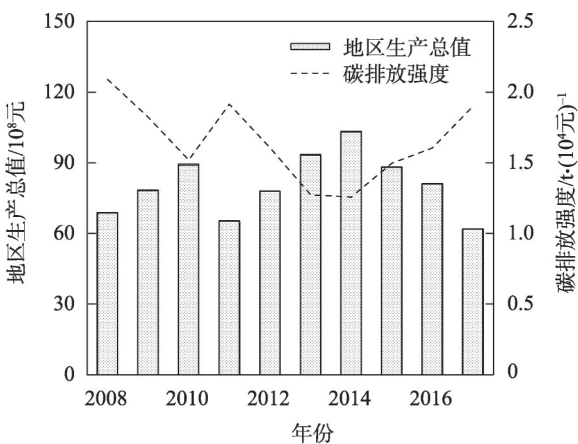


图2 2008—2017年庆城县碳排放量及其强度变化

Fig. 2 Variation of carbon emission and its intensity in Qingcheng County during 2008-2017

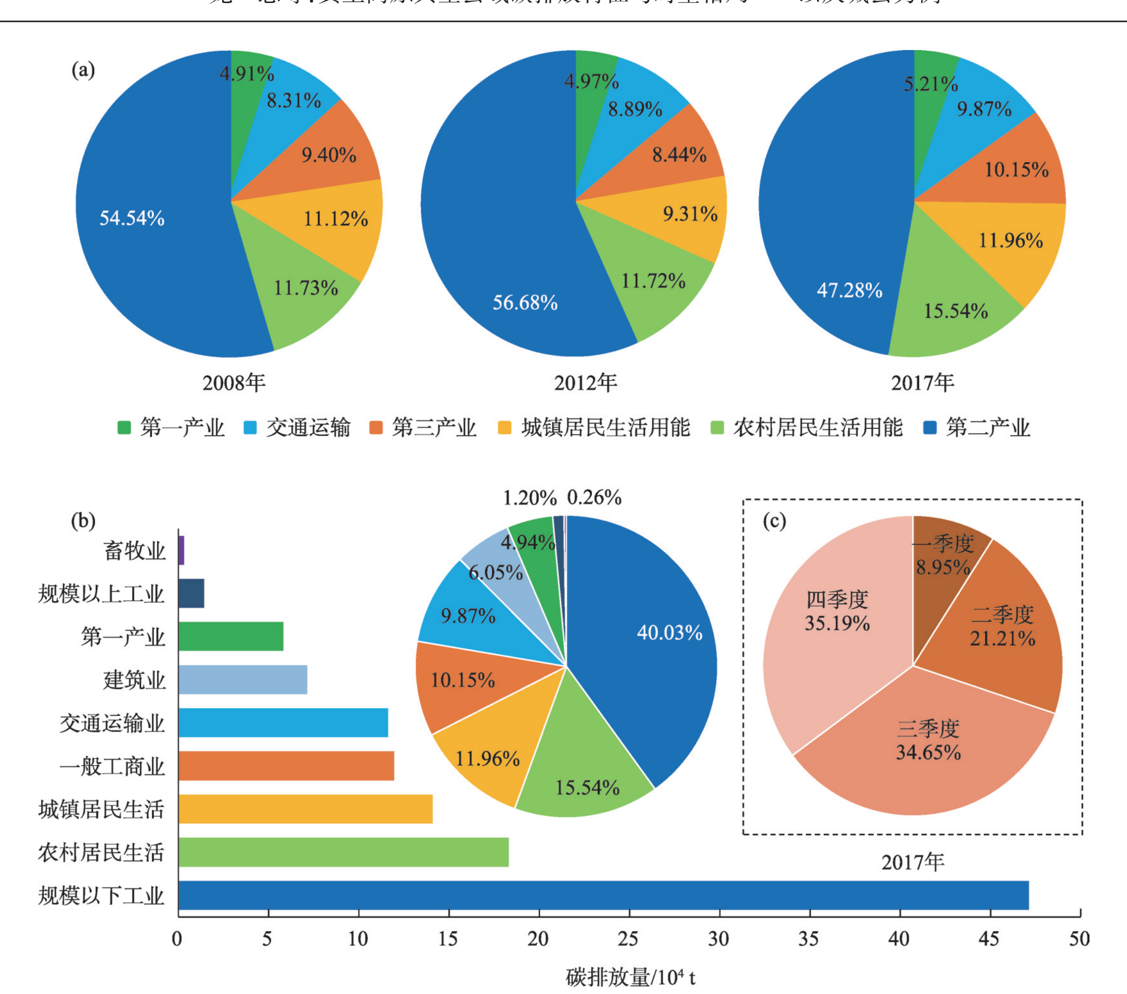


图3　2008—2017年庆城县碳排放结构及变化特征

Fig. 3　Structure and variation of carbon emissions in Qingcheng County during 2008–2017

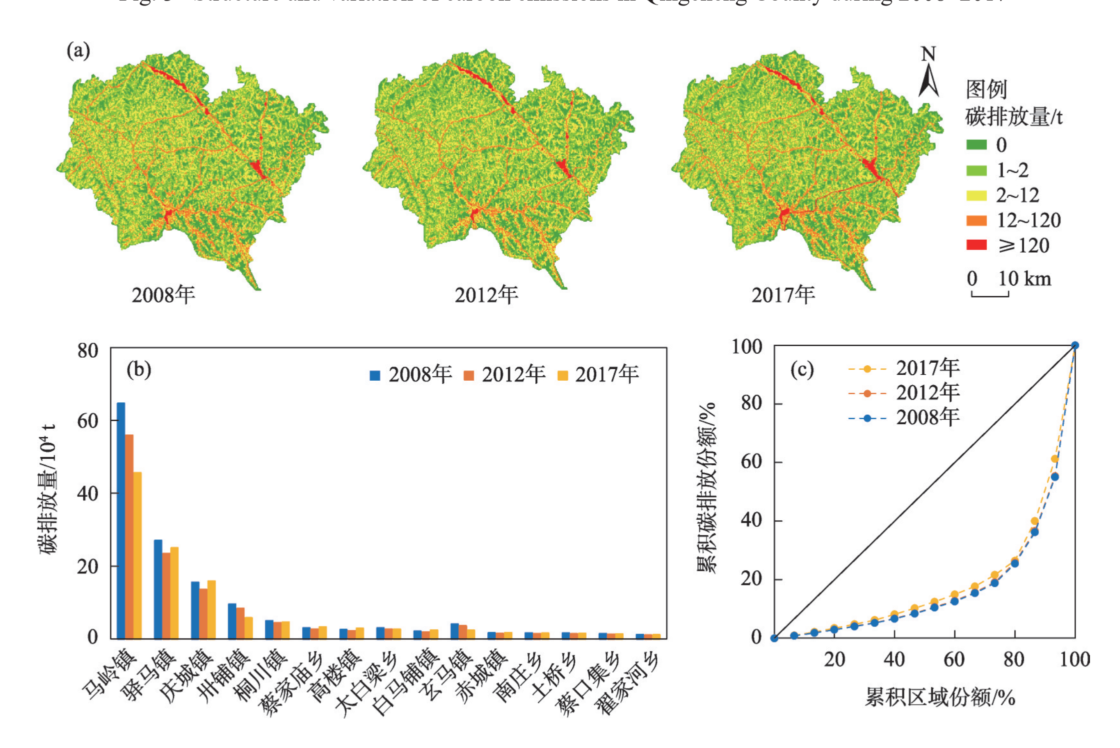


图4　2008—2017年庆城县碳排放时空特征

Fig. 4　Spatiotemporal characteristics of carbon emission in Qingcheng County during 2008–2017

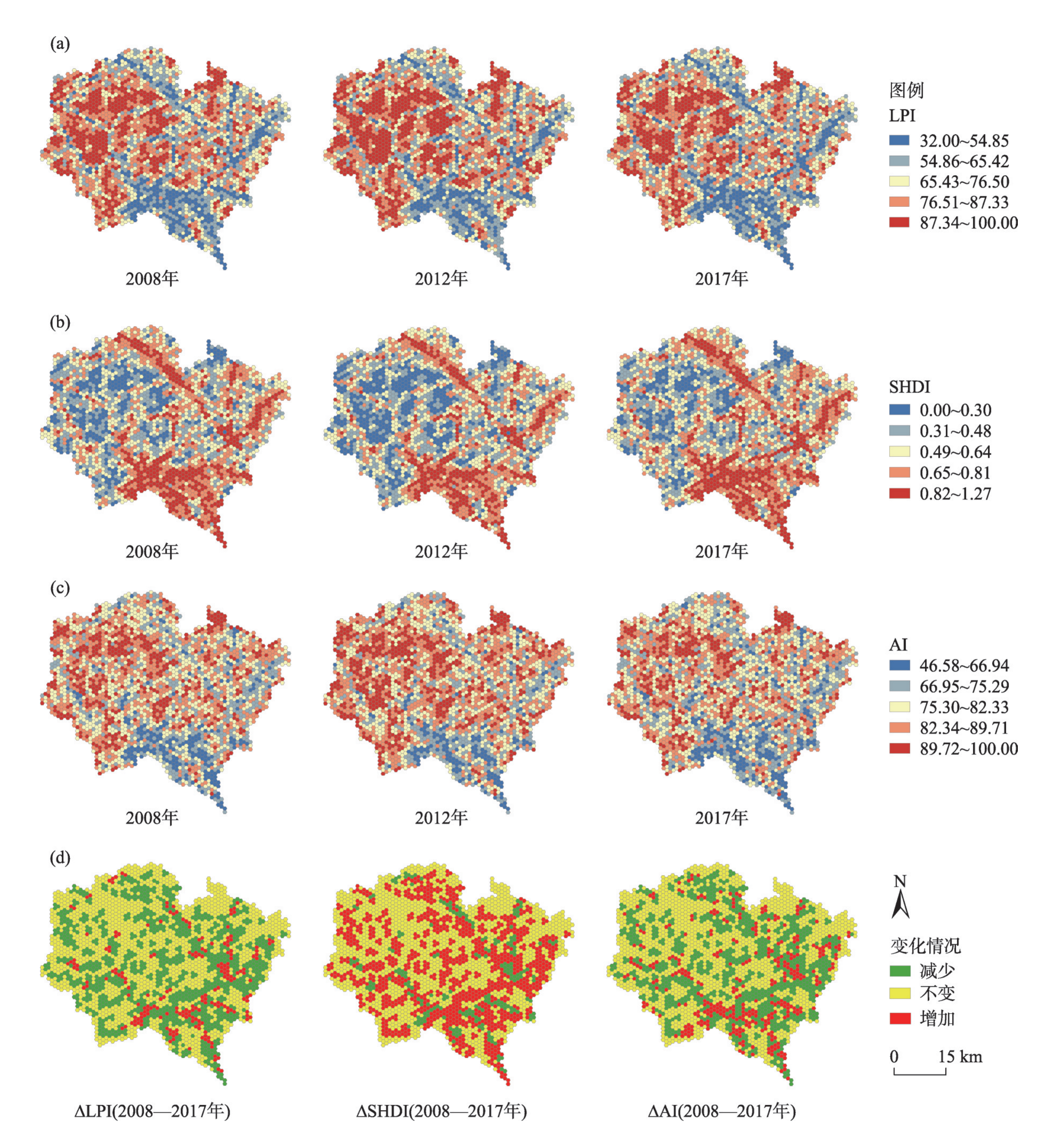


图5 2008—2017年庆城县碳排放LPI、SHDI、AI指数变化时空格局

Fig. 5 Spatiotemporal pattern of LPI, SHDI and AI of carbon emissions in Qingcheng County during 2008-2017

从聚散性来看，庆城县碳源区域空间聚集程度较高，表现为低碳源区域的集聚。碳排放AI高值区主要分布于中部、西部和北部地区，碳源类型主要为耕地；低值区主要分布在南部的驿马镇和白马铺镇（图5c）。研究期内工业集中区、乡镇和主要居民点等中、高碳区聚集度增加，交通沿线和城乡居民聚居区等中碳区域与低碳区域交错地带聚集度降低（图5d）。

3 讨论

庆城县是原石油化工厂所在地，工业以石油和天然气开采、石油加工及石油制品制造为主，自1998年开始，长庆石油勘探局部分直属机关和下辖单位相继从庆城县搬迁至西安，使庆城县经济发展受到较大冲击[57]。2006年，庆阳周边炼油厂实行“关四改一”战略部署，将马岭等地炼油厂关停。随

后庆城县境内炼油厂开始减产并筹备异地搬迁,2010年,庆城县境内炼油厂全面关停。使得庆城县工业经济低迷,工业能耗大幅下降,直接导致庆城县碳排放从2008年开始逐年下降,2011年庆城县GDP较2010年下降24.07×10⁸元,碳排放强度明显回弹(图2b)。2013年后,庆城县工业发展持续收缩,资源大县与经济穷县的矛盾加剧,出现了典型的"高资源开发,低经济增长"模式[58]。相应地,GDP也逐年下降,且降幅远高于碳排放的下降幅度,故碳排放强度表现为以2014年为转折点出现回增反弹。

庆城县地处西部欠发达地区,工业发展滞后,工业碳排放占比不到50%,远低于东部地区的县域[9],且以规模以下工业企业为主,规模以上工业企业数量少,2017年仅有24家,且呈减少态势,故规模以下工业碳排放占比远高于规模以上工业碳排放。庆城县城镇化水平较低,2017年农业人口占总人口的比重高达80.37%,农业人口基数大,占比高。庆城县冬季寒冷,霜期长达7个月,农村居民生活碳排放主要来自自供暖,而县城居民冬天为集中供暖,人均能耗和碳排放量相对较低,因此农村居民生活用能产生的碳排放量比城镇居民要高。

庆城县地处黄土高原,地形破碎,千沟万壑,乡镇、农村居民点和耕地主要分布在川区、残塬区和地势较为平缓的黄土梁和黄土峁,受黄土高原地形制约,庆城县碳源区域分布非常分散。庆城县为六盘山集中连片特困地区贫困县,经济社会发展水平较低,工业化和城镇化发展滞后,尚处在起步阶段,县域空间还未经历剧烈的土地利用变化,高碳区主要集中在马岭镇和卅铺镇的西川工业集中区、驿马镇的驿马工业集中区和庆城镇的县城区;中碳区主要集中在残塬区和交通沿线;低碳区则广泛分布于梁峁沟壑区,以耕地为主。中、高碳排放区碳排放变化较大,但占县域面积比重较小;而面积最大,以耕地为主的低碳排放区变化较小,故碳排放时空变化总体上不明显。

环江和柔远河川区以及南部的董志塬残塬区,居民点分布密集、人类生活和生产活动强度较大,高、中、低碳源区交错分布,碳源类型多样,碳源斑块破碎化程度高,故表现为碳源最大斑块指数和聚集度指数较低,碳源景观多样性指数高;中西部和北部梁峁地区碳源以耕地为主,碳源类型较为单一,多样性较差,分布较为集中,故表现为碳源最大斑块指数和聚集度指数较高,碳源景观多样性指数较低。研究期内庆城县工业集中区、乡镇和主要居民点等中、高碳排放区域斑块连片面积增大,整体性提高,多样性减少,碳源类型趋于单一化,表现为中、高碳排放区域碳源最大斑块指数和聚集度指数增加,景观多样性指数减少。受路网和城乡建设影响,耕地等低碳源区被分割破碎化,表现为碳源最大斑块指数和聚集度指数的减少,景观多样性指数增加,其中以城乡居民聚居区和路网周边等中碳区与低碳区交错地带最为明显。综上所述,不同的碳源区呈现出明显的时空格局差异。高碳区呈现出向县城区、工业集中区、中心乡镇集聚的变化特征,优势度明显增强,其空间分布受地形地貌特征影响较大,且占县域面积的比重较小。中碳区主要为乡镇和交通路网,空间分布较为分散。低碳区受高、中碳区扩张蔓延影响不断被分割破碎化,整体性、优势度和集聚度不断降低。交通沿线和城乡居民聚居区等中碳区与低碳区交错地带整体性、聚集度降低,多样性增加。

4　结　论

(1)欠发达地区县域碳排放变化和结构具有鲜明的特征。受产业结构和经济发展水平影响,庆城县碳排放量波动下降,碳排放强度波动上升;相较于东部发达地区县域而言,工业碳排放比重低,且规模以下工业碳排放要远高于规模以上工业碳排放;第三产业和生活碳排放比重相对较高,且农村居民生活碳排放量要高于城镇。

(2)庆城县碳排放空间分布符合帕累托法则,即80%的碳排放集中在20%的区域,总体表现为"整体分散,局部集聚"的空间分布特征。高碳区主要集中在川区、残塬区和县城区;中碳区主要分布在残塬区和交通沿线;低碳区则广泛分布于梁峁沟壑区。

(3)受地形地貌影响,黄土高原县域碳排放呈现出明显的时空格局差异。县城、工业集中区、主要乡镇等中、高碳区最大斑块指数增加,整体性提高,碳源多样性减少,碳源类型趋于单一化。交通沿线和城乡居民聚居区等中碳区与低碳区交错地带碳源多样性增加,聚集度降低 。

参考文献(References):

[1]　陈宇. 人类命运共同体视域中的国家传统疆域与新疆域[J]. 世

界地理研究, 2021, 30(5): 893−902. [Chen Yu. Analysis on the traditional frontier and modrern frontier from the vision of Community of Shared Future[J]. World Regional Studies, 2021, 30(5): 893−902.]

[2] Khan Uzma, Wang Huili, Ali Ishraq. A sustainable community of shared future for mankind: Origin, evolution and philosophical foundation[J]. Sustainability, 2021, 13(16): 9352. doi: 10.3390/su13169352.

[3] Nathan Andrew J, Zhang Boshu. 'A shared future for mankind': Rhetoric and reality in Chinese foreign policy under Xi Jinping[J]. Journal of Contemporary China, 2022, 31(133): 57−71.

[4] Zhang Hui. A community of shared future for mankind: The contemporary development of the social foundations theory of international law[J]. Social Sciences in China, 2019, 40(1): 186−202.

[5] Lashof Daniel A, Ahuja Dilip R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming[J]. Nature, 1990, 344: 529−531.

[6] Samset B H, Sand M, Smith C J, et al. Climate impacts from a removal of anthropogenic aerosol emissions[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(2): 1020−1029.

[7] He Huachun, Guan Hongjun, Zhu Xiang, et al. Assessment on the energy flow and carbon emissions of integrated steelmaking plants [J]. Energy Reports, 2017, 3: 29−36.

[8] Yuan Jiahai, Xu Yan, Hu Zheng, et al. Peak energy consumption and CO_2 emissions in China[J]. Energy Policy, 2014, 68: 508−523.

[9] Long Zhi, Zhang Zilong, Liang Sai, et al. Spatially explicit carbon emissions at the county scale[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 173: 105706. doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105706.

[10] Shan Yuli, Huang Qi, Guan Dabo, et al. China CO_2 emission accounts 2016−2017[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 54. doi: 10.1038/s41597−020−0393−y.

[11] Sarkodie Samuel Asumadu. Environmental performance, biocapacity, carbon & ecological footprint of nations: Drivers, trends and mitigation options[J]. Science of the Total Environment, 2021, 751: 141912. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141912.

[12] Zhang Wei, Li Jing, Li Guoxiang, et al. Emission reduction effect and carbon market efficiency of carbon emissions trading policy in China[J]. Energy, 2020, 196: 117117. doi: 10.1016/j.energy.2020.117117.

[13] Zhou Huijun, Ping Weiying, Wang Yong, et al. China's initial allocation of interprovincial carbon emission rights considering historical carbon transfers: Program design and efficiency evaluation[J]. Ecological Indicators, 2021, 121: 106918. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106918.

[14] Guo Qianqian, Su Zhifang, Chiao Chaoshin. Carbon emissions trading policy, carbon finance, and carbon emissions reduction: evidence from a quasi-natural experiment in China[J]. Economic Change and Restructuring, 2022, 55(3): 1445−1480.

[15] Li Yanmei, Li Tingting, Lu Shuangshuang. Forecast of urban traffic carbon emission and analysis of influencing factors[J]. Energy Efficiency, 2021, 14(8): 84. doi: 10.1007/s12053−021−10001−0.

[16] Deutch John. Decoupling economic growth and carbon emissions [J]. Joule, 2017, 1(1): 3−5.

[17] Khan Khalid, Su Chiwei. Urbanization and carbon emissions: A panel threshold analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(20): 26073−26081.

[18] Wang Keying, Wu Meng, Sun Yongping, et al. Resource abundance, industrial structure, and regional carbon emissions efficiency in China[J]. Resources Policy, 2019, 60: 203−214.

[19] 范志欣, 方修琦, 苏筠. 全球碳排放格网化格局的变化[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(5): 505−512. [Fan Zhixin, Fang Xiuqi, Su Yun. Changes in global grid pattern of carbon emissions[J]. Climate Change Research, 2018, 14(5): 505−512.]

[20] Cai Bofeng, Wang Xiuquan, Huang Guohe, et al. Spatiotemporal changes of China's carbon emissions[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(16): 8536−8546.

[21] Chen Jiandong, Gao Ming, Cheng Shulei, et al. County-level CO_2 emissions and sequestration in China during 1997−2017[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 391. doi: 10.1038/s41597−020−00736−3.

[22] Chen Qianli, Cai Bofeng, Dhakal Shobhakar, et al. CO_2 emission data for Chinese cities[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 126: 198−208.

[23] Chen Yi, Wang Xinyu, Sha Zhijie, et al. Uncertainty analysis for multi-state weighted behaviours of rural area with carbon dioxide emission estimation[J]. Applied Soft Computing, 2012, 12(8): 2631−2637.

[24] Song Dan, Su Meirong, Yang Jin, et al. Greenhouse gas emission accounting and management of low-carbon community[J]. Scientific World Journal, 2012, 2012: 613721. doi: 10.1100/2012/613721.

[25] Zhang Zengkai, Guan Dabo, Wang Ran, et al. Embodied carbon emissions in the supply chains of multinational enterprises[J]. Nature Climate Change, 2020, 10(12): 1096−1101.

[26] Chandio Abbas Ali, Akram Waqar, Ahmad Fayyaz, et al. Dynamic relationship among agriculture-energy-forestry and carbon dioxide (CO_2) emissions: Empirical evidence from China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27 (27): 34078−34089.

[27] Cheng YungHsiang, Chang YuHern, Lu I J. Urban transportation energy and carbon dioxide emission reduction strategies[J]. Applied Energy, 2015, 157: 953−973.

[28] 李雪梅, 张庆. 天津市能源消费碳排放影响因素及其情景预测[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4): 997−1004. [Li Xuemei, Zhang Qing. Factors affecting carbon emission from energy consumption in Tianjin[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(4): 997−1004.]

[29] Huang Lizhen, Krigsvoll Guri, Johansen Fred, et al. Carbon emission of global construction sector[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 1906−1916.

[30] Lenzen Manfred, Sun Yayen, Faturay Futu, et al. The carbon footprint of global tourism[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(6): 522−

528.

[31] Prastiyo Slamet Eko, Irham, Hardyastuti Suhatmini, et al. How agriculture, manufacture, and urbanization induced carbon emission? The case of Indonesia[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(33): 42092-42103.

[32] Yang Lisha, Lin Boqiang. Carbon dioxide-emission in China's power industry: Evidence and policy implications[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 258-267.

[33] Chu Yingmin, Xie Luyue, Yuan Zaijian. Composition and spatio-temporal distribution of the agro-ecosystem carbon footprint: A case study in Hebei Province, North China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 190: 838-846.

[34] 刘竹, 关大博, 魏伟. 中国二氧化碳排放数据核算[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(7): 878-887. [Liu Zhu, Guan Dabo, Wei Wei. Carbon emission accounting in China[J]. Scientia Sinica Terrae, 2018, 48(7): 878-887.]

[35] Pei Jie, Niu Zheng, Wang Li, et al. Spatial-temporal dynamics of carbon emissions and carbon sinks in economically developed areas of China: A case study of Guangdong Province[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 13383. doi: 10.1038/s41598-018-31733-7.

[36] Shan Yuli, Guan Dabo, Zheng Heran, et al. Data descriptor: China CO_2 emission accounts 1997-2015[J]. Scientific Data, 2018, 5: 170201. doi: 10.1038/sdata.2017.201.

[37] Wei Wendong, Wang Xibo, Zhu He, et al. Carbon emissions of urban power grid in Jing-Jin-Ji region: Characteristics and influential factors[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 168: 428-440.

[38] Cai Bofeng, Guo Huanxiu, Ma Zipeng, et al. Benchmarking carbon emissions efficiency in Chinese cities: A comparative study based on high-resolution gridded data[J]. Applied Energy, 2019, 242: 994-1009.

[39] Mi Zhifu, Guan Dabo, Liu Zhu, et al. Cities: The core of climate change mitigation[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207: 582-589.

[40] Mi Zhifu, Zheng Jiali, Meng Jing, etal. Carbon emissions of cities from a consumption-based perspective[J]. Applied Energy, 2019, 235: 509-518.

[41] Shao Ling, Guan Dabo, Zhang Ning, et al. Carbon emissions from fossil fuel consumption of Beijing in 2012[J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(11): 114028. doi: 10.1088/1748-9326/11/11/114028.

[42] 王少剑, 谢紫寒, 王泽宏. 中国县域碳排放的时空演变及影响因素[J]. 地理学报, 2021, 76(12): 3103-3118. [Wang Shaojian, Xie Zihan, Wang Zehong. The spatiotemporal pattern evolution and influencing factors of CO_2 emissions at the county level of China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(12): 3103-3118.]

[43] 刘华军, 邵明吉, 吉元梦. 中国碳排放的空间格局及分布动态演进——基于县域碳排放数据的实证研究[J]. 地理科学, 2021, 41(11): 1917-1924. [Liu Huajun, Shao Mingji, Ji Yuanmeng. The spatial pattern and distribution dynamic evolution of carbon emissions in China: Empirical study based on county carbon emission data[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(11): 1917-1924.]

[44] 莫惠斌, 王少剑. 黄河流域县域碳排放的时空格局演变及空间效应机制[J]. 地理科学, 2021, 41(8): 1324-1335. [Mo Huibin, Wang Shaojian. Spatio-temporal evolution and spatial effect mechanism of carbon emission at county level in the Yellow River Basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(8): 1324-1335.]

[45] 胡孟然. 中国县域碳排放空间格局及影响因素研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021. [Hu Mengran. Spatial Pattern and Influencing Factors of Carbon Emissions at County Level in China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.]

[46] 刘畅, 苏筠, 黎玲玲. 中国县域能源消费碳排放估算及其空间分布[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(1): 113-119. [Liu Chang, Su Yun, Li Lingling. The estimation and spatial distribution of the carbon emissions of county units in China[J]. Environmental Pollution and Control, 2020, 42(1): 113-119]

[47] 汪浩, 陈操操, 潘涛, 等. 县域尺度的京津冀都市圈CO_2排放时空演变特征[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 385-393. [Wang Hao, Chen Caocao, Pan Tao, et al. County scale characteristics of CO_2 emission's spatial-temporal evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region[J]. Environmental Science, 2014, 35(1): 385-393.]

[48] 朱松丽, 汪航, 王文涛, 等. "十二五"期间中国区域低碳经济与国土空间开发格局的协调发展研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27 (9): 135-142. [Zhu Songli, Wang Hang, Wang Wentao, et al. Status of coordinated development between regional low-carbon economy and spatial land-use pattern in the 12th Five Year Plan[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27 (9): 135-142]

[49] 胡向东, 王济民. 中国畜禽温室气体排放量估算[J]. 农业工程学报, 2010, 26 (10): 247-252. [Hu Xiangdong, Wang Jimin. Estimation of livestock greenhouse gases discharge in China[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 247-252.]

[50] 刘培芳, 陈振楼, 许世远, 等. 长江三角洲城郊畜禽粪便的污染负荷及其防治对策[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(5): 456-460. [Liu Peifang, Chen Zhenlou, Xu Shiyuan, et al. Waste loading and treatment strategies on the excreta of domestic animals in the Yangtze Delta[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2002, 11(5): 456-460.]

[51] 宋奇, 史舟, 冯春晖, 等. 基于1990—2019年多时相影像的干旱区绿洲景观格局分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 594-604. [Song Qi, Shi Zhou, Feng Chunhui, et al. Analysis of landscape pattern from 1990 to 2019 based on multi-temporal imagery in arid oasis[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 594-604.]

[52] 郭杰, 丁冠乔, 刘晓曼, 等. 城镇景观格局对区域碳排放影响及其差别化管控研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(10): 55-61. [Guo Jie, Ding Guanqiao, Liu Xiaoman, et al. Effect of urban landscape pattern on regional carbon emissions and its differential regulation[J]. China Population, Resources and Environ-

ment, 2018, 28(10): 55−61.]

[53] 朱东国, 谢炳庚, 熊鹏. 基于三维景观格局指数的张家界市土地利用格局时空演化[J]. 经济地理, 2017, 37(8): 168−175. [Zhu Dongguo, Xie Binggeng, Xiong Peng. Spatial-temporal evolution of land-use pattern changes in Zhangjiajie city based on three-dimensional landscape pattern indices[J]. Economic Geography, 2017, 37(8): 168−175.]

[54] 付扬军, 师学义, 和娟. 汾河流域景观破碎化时空演变特征[J]. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1606−1619. [Fu Yangjun, Shi Xueyi, He Juan. The spatio-temporal evolution characteristics of landscape fragmentation in Fenhe River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(8): 1606−1619.]

[55] 张皓玮, 李欣, 殷如梦, 等. 旅游城镇化地区土地利用景观格局指数的粒度效应——以扬州市广陵区为例[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2018, 41(3): 122−130. [Zhang Haowei, Li Xin, Yin Rumeng, et al. Grain size effect of urbanization tourist areas of land use landscape pattern index: A case study of Guangling district of Yangzhou[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2018, 41(3): 122−130.]

[56] 马振刚, 李黎黎, 许学工, 等. 北方农牧交错带地区土地利用的粒度效应研究——以化德县为例[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(5): 92−98. [Ma Zhengang, Li Lili, Xu Xuegong, et al. Grain size effects of land-use in farming-pastoral transitional zone of northern China: A case study of Huade county[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(5): 92−98.]

[57] 寇星亮. 长庆油田机关搬迁事件的社会学分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2013. [Kou Xingliang. A Sociological Analysis on the Event of Changqiong Oilfield Unites' Relocation[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.]

[58] 张子龙, 王博, 龙志, 等. 财政分权、产业升级、技术进步与"资源诅咒"——基于黄河流域资源型城市的实证分析[J]. 经济经纬, 2021, 38(3): 133−141. [Zhang Zilong, Wang Bo, Long Zhi, et al. Fiscal decentralization, industrial upgrading, technological progress and "resource curse": Empirical analysis of resource-based cities in the Yellow River Basin[J]. Economic Survey, 2021, 38(3): 133−141.]

Spatiotemporal patterns and characteristics of carbon emissions in the Loess Plateau: A case study of Qingcheng County

LONG Zhi[1,2,3], SUN Yingqi[1,4], LANG Lixia[1,2,3], CHEN Xingpeng[1,2,3], ZHANG Zilong[1,4], PANG Jiaxing[1,5,6]

(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. Research Institute for Circular Economy in Western China, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 4. Institute of Green Development for the Yellow River Drainage Basin, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 5. Institute of County Economic Development, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 6. Research and Evaluation Center for Ecological Civilization Construction, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: In China, the county is not only an important contributor to carbon emissions and a major carbon sink zone but also a key administrative unit for the implementation of China's national goals for carbon peak and carbon neutrality. Focusing on Qingcheng County as a typical county in the Loess Plateau, we investigate the carbon emission characteristics and spatiotemporal patterns, to raise awareness of the need for ecological protection of the Yellow River Basin, while achieving high-quality development and green and low carbon transformation. The key results of our study are as follows. (1) The change and structure of county carbon emission in underdeveloped areas have distinct characteristics. Industries below the designated size are the largest source of carbon emissions in Qingcheng County, having a low proportion of industrial carbon emissions but a relatively high proportion of service sector and household carbon emissions. (2) The spatial distribution of carbon emissions in Qingcheng County conforms to the Pareto Principle: 80% of carbon emissions are concentrated in 20% of the region, which is characterized by "overall dispersion and local agglomeration". The high carbon zones are mainly concentrated in the valley, broken plateau area, and urban area. The medium carbon zones are mainly distributed in the broken plateau area and along the traffic line. Low carbon zones are widely distributed in ridge, hill, and gully areas. (3) The county carbon emissions in the Loess Plateau show clear temporal and spatial pattern differences that are affected by differences in topography. The largest patch index of medium and high carbon zones, such as urban areas, industrial zones, and major towns, increases, the integrity improves, the diversity of carbon sources decreases, and the types tend to be single. The carbon source diversity increases and the aggregation degree decreases in the ecotone between medium carbon zones and low carbon zones, such as transportation lines and residential areas.

Keywords: Loess Plateau; carbon emissions; spatiotemporal pattern; Qingcheng County